

유출홀이 설치된 배열 충돌제트의 유동 및 열전달 특성

이동호*·윤필현**·조형희†
(2001년 4월 2일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

Flow and Heat/Mass Transfer Characteristics of Arrays of Impingement Jets with Effusion Holes

Dong Ho Rhee, Pil-Hyun Youn and Hyung Hee Cho

Key Words: Impingement Jet(충돌제트), Effusion Hole(유출홀), Heat/Mass Transfer(열/물질전달) Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌승화법)

Abstract

The present study has been conducted to investigate heat/mass transfer characteristics on a target plate for arrays of circular impingement jets with and without effusion holes. A naphthalene sublimation method is employed to determine local heat/mass transfer coefficients on the target plate. The effusion holes are located at the center of four injection holes in the injection plate where the spent air is discharged through the effusion hole after impingement on the target plate. For the array jet impingement without effusion holes, the array jets are injected into the crossflow formed by upstream spent air because the impinged jets must flow to the open exit. For small gap distances, heat/mass transfer coefficients without effusion holes are very non-uniform due to crossflow effects and re-entrainments of spent air. However, uniform distributions and enhanced values of heat/mass transfer coefficients are obtained by installing the effusion holes. For large gap distances, the crossflow has little influence on heat/mass transfer characteristics on the target plate due to the large cross-sectional open area between the injection and target plates. Therefore, the distributions and levels of heat/mass transfer coefficients are almost the same for both cases.

기호설명

d : 분사홀 출구 직경	Pr : Prandtl 수
D : 유출홀 직경	Re_d : Reynolds 수
dy : 나프탈렌 승화깊이	S : 분사홀 간격
$d\tau$: 나프탈렌 표면의 유동장 노출시간	Sc : Schmidt 수, ν/D_{naph}
D_{naph} : 나프탈렌 확산계수	Sh : 국소 Sherwood 수, Eq. (2)
l : 분사판 두께	\bar{Sh} : 폭방향 평균 Sherwood 수, Eq. (3)
Nu : Nusselt 수	$\bar{\bar{Sh}}$: 면적평균 Sherwood 수, Eq. (4)
	x, y : 좌표계, Fig. 2
	H : 분사판과 충돌판 사이 간격
	h : 국소 열전달계수
	h_m : 국소 물질전달계수
	\dot{m} : 단위면적당 물질전달량
	z : 충돌판으로부터 수직좌표, Fig. 2

* 연세대학교 대학원

** (주)LG전선 기계연구소

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

그리스문자

- ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도
 $\rho_{v,w}$: 나프탈렌 표면에서의 나프탈렌 증기밀도
 $\rho_{v,\infty}$: 분사제트 나프탈렌 증기밀도

1. 서론

충돌제트(jet impingement)는 국소적으로 높은 열전달 및 물질전달 효과를 가지기 때문에 요소의 냉각, 가열, 건조 등에 있어서 매우 효과적인 방법이다. 충돌제트에 의한 요소의 냉각은 일반적인 대류 냉각방식에 비해 국소적으로 매우 높은 냉각효과를 가지며, 냉각이 필요한 영역에 쉽게 적용할 수 있는 이점을 갖고 있다. 따라서, 가스터빈 블레이드, 전자장비 등의 냉각에 광범위하게 적용되고 있다. 이 경우 단일 충돌제트(single jet impingement)를 사용하는 것 보다 여러 개의 제트를 동시에 사용하는 경우(배열충돌제트; array jet impingement) 넓은 영역에서 균일한 열/물질전달 효과를 얻을 수 있다.

배열 충돌 제트는 단일충돌제트에 비해 몇 가지 기본적인 차이점이 있다. 배열 충돌 제트의 경우 분사된 제트간에 두 가지 형태의 상호작용이 존재하게 된다.⁽¹⁾ 첫째는 제트가 충돌면(target surface)에 부딪히기 전에 일어나는 인접제트간의 상호작용이다. 이러한 상호작용은 인접제트간의 간격이 작을 때와 제트 출구와 충돌면의 간격이 상대적으로 큰 경우 증대된다. 둘째는 벽제트(wall jet) 영역에서의 인접제트간의 충돌에 의한 상호 작용이다. 이러한 벽제트 영역에서의 상호작용은 인접제트가 가까이 있을 때, 제트 출구와 충돌면의 간격이 작을 때 그리고 제트의 속도가 클 때 더욱 강하게 나타난다.

지금까지 이러한 단일/배열충돌제트에서의 유동 및 열전달 특성에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다.⁽²⁻⁵⁾

일반적으로, 배열충돌제트의 경우 분사제트가 충돌면에 부딪힌 후 횡방향으로 이동하면서 덕트 유동(duct flow)과 유사한 횡방향 유동을 형성한다. 하류로 진행하면서 분사된 제트의 유량이 증가함에 따라 이러한 횡방향 유동에 의한 영향이 크게 나타난다. 윤필현 등⁽⁶⁾에 의하면, 이러

한 횡방향 유동이 충돌면 부근에서 제트 중심부의 난류강도를 증가시켜 정체점(stagnation point) 주위에서의 열전달계수가 증가하는 것으로 나타났다. 반면 충돌제트와 제트 사이 영역(mid-way region)에서는 열경계층(thermal boundary layer)의 발달로 인하여 열전달계수가 점점 감소한다. 따라서 전체 충돌면에서 불균일한 냉각효과를 나타내게 되며 이것은 냉각하고자 하는 요소에 심각한 열응력 문제를 야기할 수 있다.

배열충돌제트의 경우 앞에서 언급한 횡방향 유동에 의한 영향뿐만 아니라 분사된 제트가 충돌 후 인접제트에 재흡입(re-entrainment)되는 것에 의해 전반적인 열전달 효과가 감소하게 된다.

배열충돌제트에서 이러한 횡방향 유동에 의한 불균일성을 감소시키고 재흡입 효과를 감소시킬 수 있는 한가지 방법으로 유출홀을 설치하여 분사된 제트를 유출시키는 방법이 있다.

Huber와 Viskanta⁽⁷⁾는 분사판에 유출홀이 설치되어 있는 경우에 대하여 충돌면에서의 국소/평균 열전달계수를 측정하였다. 그 결과 유출홀을 통해 분사된 제트를 유출시킴으로써 유동의 재흡입을 감소시키고 충돌면에서의 열전달이 증가되는 것으로 나타났다. Cho와 Goldstein,⁽⁸⁾ Cho와 Rhee,⁽⁹⁾ 이동호와 조형희⁽¹⁰⁾ 등은 충돌판에 유출홀이 설치된 충돌제트/유출냉각에 대하여 분사판과 충돌판 사이의 홀 배열변화 및 간격변화에 따른 열전달특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 분사판에 유출홀을 설치한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 분사판과 충돌판 사이의 간격을 변화시켜가며 충돌면에서의 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 국소 열/물질전달 특성을 고찰하기 위하여 물질전달실험의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하였다. 이 실험방법은 열전달실험방법에서 발생하는 진동 및 복사오차를 제거할 수 있으며, 벽면 경계조건은 열전달 실험조건에 있어서 등온조건에 해당한다.

보다 정확하게 국소 열/물질전달 특성을 고찰하기 위해서는 분사판과 충돌판 사이에서의 유동장 해석이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 유출홀이 설치된 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 분사판과 충돌판 사이에서의 유동특성을 고찰하였다.

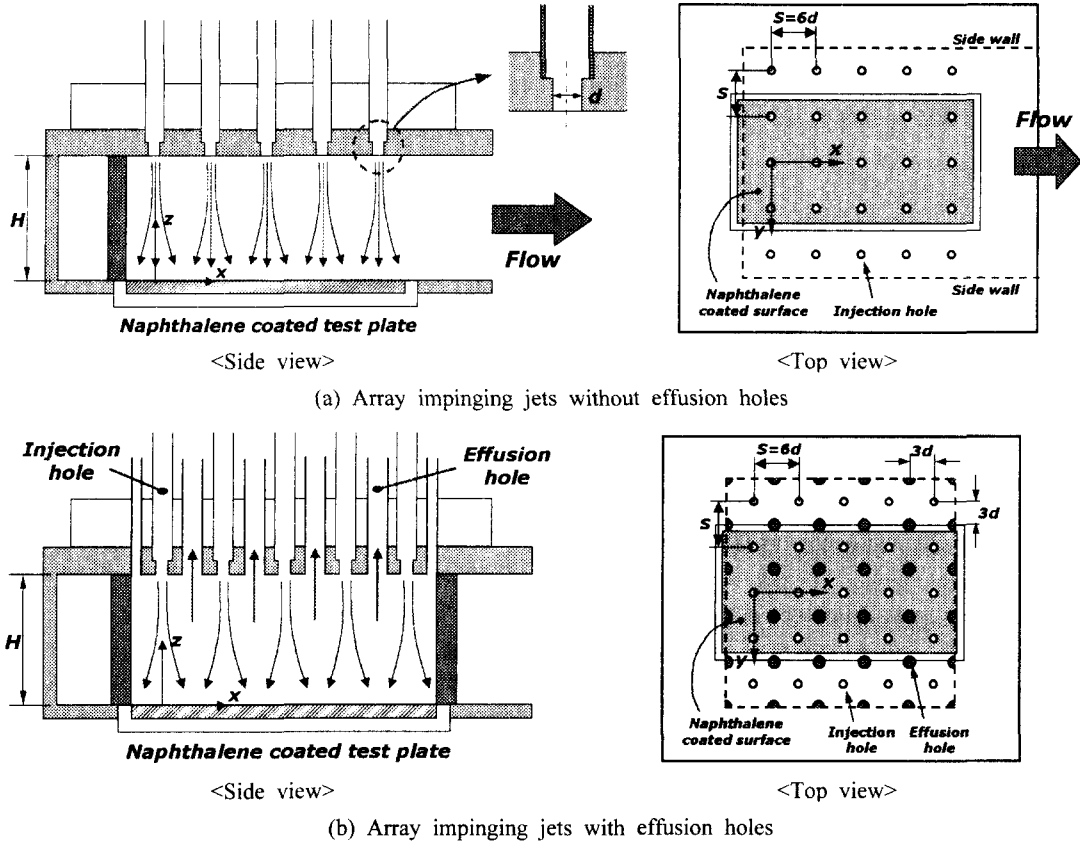


Fig. 1 Schematic views of hole arrangements and target plates

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 송풍기(5 HP), 열교환기, 오리피스 유량계(orifice flow meter), 정체실(plenum chamber), 시험부(test section)로 구성되어 있으며, 자세한 사양은 윤필현 등⁽⁶⁾에 제시되어 있다.

실내 공기는 속도조절이 가능한 송풍기를 통하여 공급되며, 항온조(constant temperature reservoir)와 연결된 열교환기를 통하여 등온으로 유지된다. 정체실 입구부분에 배플(baffle)과 하니콤(honeycomb)을 설치하여 유동이 균일하게 공급되도록 하였다. 정체실 유동의 온도는 T-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 정체실의 공기는 분사관(injection tube)을 통해 분사홀로 분배되며, 이후 분사관을 통해 충돌판으로 분사된다. 각각의 분사관을 통과하는 동안 압력강

하가 동일하게 되도록 분사관의 길이는 동일하게 제작되었다.

Fig. 1에 유출홀이 설치되지 않은 경우와 설치된 경우에 대한 배열충돌제트 시험부가 나타나 있다. 두 경우 모두 분사홀은 25개이며, Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 출구면적이 감소하는 형상을 갖는다. 분사홀의 입구 직경은 15 mm이며, 분사관의 중간이후 홀 직경, $d=10$ mm로 축소되도록 제작하였다. 분사홀간의 간격(pitch)은 60 mm ($S/d=6$)이며, 분사관의 두께는 20 mm ($l/d=2$)이다.

유출홀이 설치되지 않은 경우, 시험부는 3면이 막혀있는 덕트와 같은 형상을 갖는다. 따라서, Fig. 1(a)에 제시된 것과 같이 한쪽 면이 개방된 덕트로 배열제트가 분사되며, 개방된 면쪽으로 횡방향 유동이 발생하게 된다.

유출홀이 설치된 경우, 배열제트는 4면이 모두 막힌 챔버(chamber)로 분사되며, 이후 분사관에

설치된 유출홀을 통하여 밖으로 빠져나가게 된다. 유출홀은 4개의 분사홀 사이 중심에 위치하도록 하였으며, 이때 유출홀의 직경, $D=15$ mm이고, 유출홀 사이 간격은 분사홀의 경우와 마찬가지로 60 mm ($S/D=4$)이다.

유출홀이 설치되지 않은 경우와 설치된 경우 모두 벽면은 분사홀로부터 $S/2$ 만큼 떨어져 있도록 하였으며, 이를 통해 대칭적인 경계조건을 갖도록 하였다.

분사판과 충돌판 사이 간격(H)은 $H/d=0.5$ 부터 $H/d=10.0$ 까지 변화시켜 가면서 실험을 수행하였으며, 이때 분사제트의 Re 수는 $Re_d=10,000$ 으로 고정하였다. Fig. 1에서 제시된 바와 같이 국소 열/물질전달계수를 측정하기 위하여 나프탈렌이 코팅된 시편을 충돌판에 설치하였다. 시편의 크기는 300×150 mm ($30d \times 15d$)이다.

2.2 승화깊이 측정장치

열/물질전달계수를 계산하기 위해서 시험시편의 나프탈렌층의 표면형상을 실험전후에 측정하여 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정한다. 이를 위한 측정장치는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer; LBB-375TA-020) 및 2차원 자동이송장치로 구성된다. 측정장치의 자세한 사양은 Cho와 Rhee⁽⁹⁾와 동일하다.

2.3 열/물질전달계수

국소 물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy/dt)}{\rho_{v,w}} \quad (1)$$

본 연구에서는 분사되는 제트에 나프탈렌이 포함되어있지 않으므로 $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = \frac{h_m d}{D_{naph}} \quad (2)$$

여기서, D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽¹²⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

폭방향(spanwise)의 평균 Sh는 다음과 같이 구한다.

$$\overline{Sh} = \frac{\left(\int_0^{S/2} Sh dy \right)}{S/2} \quad (3)$$

더불어 전체적인 열/물질전달의 효과를 보기 위하여 면적 평균 Sh를 다음과 같이 정의하였다.

$$\overline{Sh} = \frac{\int_{x/d=-3}^{x/d=26} \overline{Sh} d(x/d)}{29} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 실험을 통하여 얻어진 값들을 수치적분을 통하여 계산하면 폭방향 평균 및 면적 평균값을 구할 수 있다.

앞에서 계산된 물질전달계수는 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며,⁽¹³⁾ 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{0.4} \quad (5)$$

실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock⁽¹⁴⁾이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 전체적으로 7.1% 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같은 불확실성은 대부분 나프탈렌의 물성치의 불확실성에 기인하며, 나프탈렌 승화깊이에 대한 불확실성은 0.7%로 매우 작다.

2.4 수치해석

유출홀이 설치된 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 배열충돌제트의 유동장을 해석하기 위하여 상용 프로그램인 FLUENT V4.5를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

수치계산에서 적용된 조건은 실험의 경우와 동일하게 하였다. 격자수와 계산시간을 줄이기 위해서 벽면에 대칭조건을 적용하였으며, 격자수는 경우에 따라 다르지만 약 20만개정도로 하였다. 난류 유동장에 대한 정상상태(steady state)에서 Reynolds Stress 난류모델(RSM)을 적용하였으며, 벽면 부근에서는 standard wall function을 적용하였다.

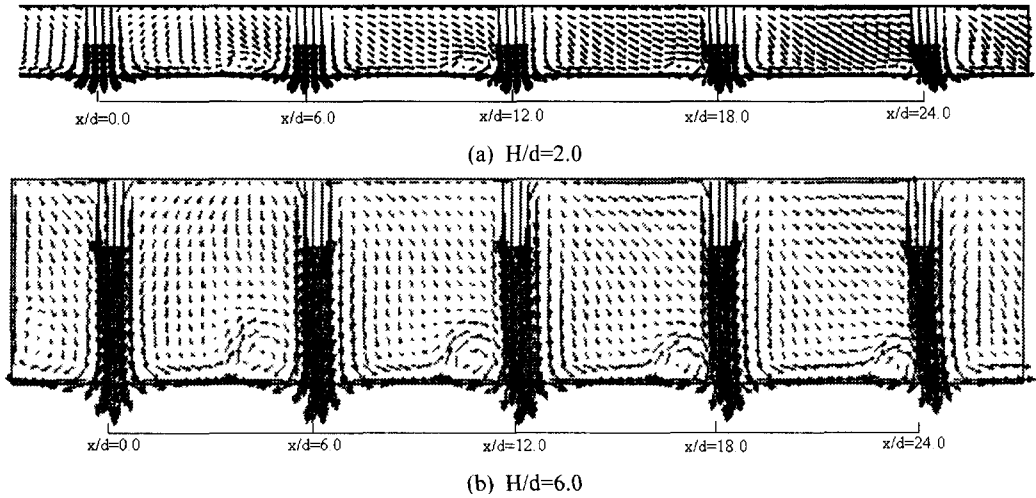


Fig. 2 Velocity vector plots at center-plane for array impinging jets without effusion holes

3. 실험결과 및 토의

3.1 유동특성

Fig. 2는 유출홀이 설치되지 않은 경우에 대한 제트 중심면($y/d=0.0$)에서의 속도벡터를 나타내는 그림이다. $H/d=2.0$ 의 경우(Fig. 2(a)), 하류 영역에 횡방향 유동이 형성되며, 충돌제트와 횡방향 유동간의 상호작용으로 인하여 충돌제트의 상류쪽 영역에 작은 와류가 형성된다. 하류로 진행하면서 배열제트에 의해 분사된 유체가 누적되면서 횡방향 유동의 유량 및 속도가 증가하게 된다. 따라서, 이러한 횡방향 유동의 영향으로 인하여 하류 영역($x/d>18.0$)에서는 분사되는 제트의 중심이 하류쪽으로 편향되는 현상이 나타난다. $H/d=6.0$ 인 경우(Fig. 2(b)), 시험부의 단면적이 크기 때문에 횡방향 유동의 영향이 감소한다. $H/d=2.0$ 인 경우에 비해 충돌제트의 상류영역에 형성되는 와류의 크기가 증가하며, 제트의 중심이 하류 쪽으로 편향되는 현상이 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 $H/d=2.0$ 인 경우에 대해서 유출홀이 설치되지 않은 경우 1, 3, 5번째 분사홀 중심단면($y-z$ 면) 및 유출홀이 설치된 경우 분사홀 중심단면에서의 속도벡터를 나타내는 그림이다. 유출홀이 설치되지 않은 경우(Figs. 3(a)-(c)), 대칭면인 $y/d=\pm 3.0$ 부근에서 인접제트간의 상호작용으로 인하여 강한 상승유동 및 큰 와류가 형성된다. 이러한 와류는 $x/d=0.0$ 인 경우, 와류의 중심이

$y/d=\pm 2.3$, $z/d=0.9$ 에 위치하지만, $x/d=24.0$ 인 경우, $y/d=\pm 1.5$, $z/d=1.0$ 에 위치하는 것으로 나타났다. 따라서, 하류로 진행하면서 와류의 중심이 충돌면으로부터 멀어지며, 분사제트쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 하류로 진행하면서 횡방향 유동량(유동속도)의 증가 및 이로 인한 2차유동의 발달에 기인하는 것으로 예상된다.

따라서, 유출홀이 설치되지 않은 경우, 와류의 영향으로 인하여 하류쪽으로 진행하면서 사용유체(spent air)가 분사제트로 재흡입되는 유동이 증가하며, 또한 분사제트가 충돌면으로 분사되면서 확산되는 정도가 증가하는 것을 알 수 있다. 유출홀이 설치된 경우(Fig. 3(d)), 대칭면($y/d=\pm 3.0$) 부근에서의 유동특성은 유출홀이 설치되지 않은 경우와 유사하다. 하지만, 이 영역에서 발생하는 와류의 크기가 더 작으며, 와류의 중심이 좀더 대칭면 쪽으로 치우친 것을 알 수 있다. 따라서, 분사된 제트의 재흡입, 분사제트의 확산 정도가 유출홀이 설치되지 않은 경우에 비해 약할 것으로 예상된다.

Fig. 4는 유출홀이 설치된 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 $H/d=1.0$, $Re_d=7,000$ 일 때 충돌면에서의 유막가시화 결과를 나타내는 그림이다.

유출홀이 설치되지 않은 경우(Fig. 4(a)), 상류영역에서는 대칭적인 분포가 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 하류로 진행하면서($x/d>12.0$) 횡방향 유동성분이 증가하기 때문에 제트에 의해

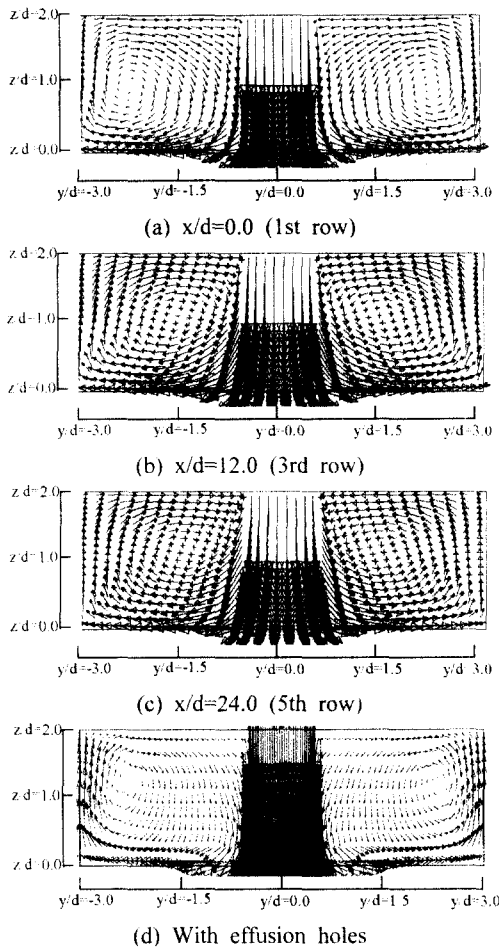


Fig. 3 Velocity vectors at selected planes for array impinging jets without and with effusion holes at $H/d=2.0$ (not in scale)

영향받는 영역(밝은 영역)이 하류 쪽으로 치우치는 등 비대칭적인 분포가 나타난다. 이러한 결과는 앞서 제시한 수치해석 결과(Fig. 2)와 정성적으로 일치하는 것을 알 수 있다.

유출홀이 설치된 경우(Fig. 4(b)), 분사된 제트는 분사판에 설치된 유출홀을 통해 빠져나가기 때문에 전 영역에서 대칭적인 분포가 나타났다.

3.2 국소 열/물질전달특성

Fig. 5는 유출홀이 설치되지 않은 경우 $Re_d=10,000$ 일 때 판 사이 간격(H) 변화에 따른 등 Sh 선도 분포를 나타내는 그림이다.

$H/d=1.0$ 인 경우, 상류영역($x/d<9.0$)에서는 대칭

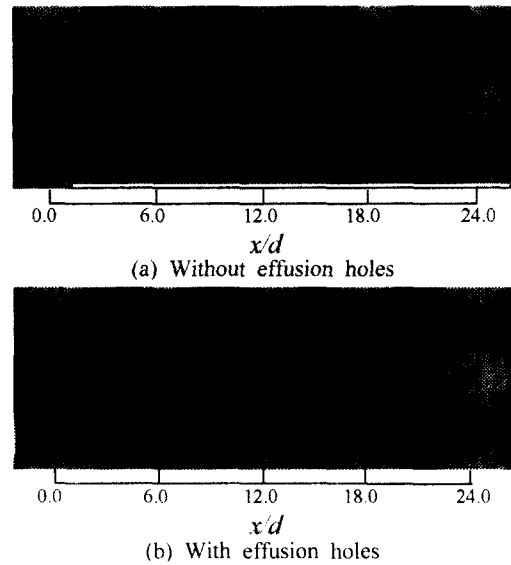


Fig. 4 Surface flow visualization by oil and lamp-black method at $H/d=1.0$ and $Re_d=7,000$

적인 분포가 나타나며, 일반적인 충돌제트의 경우와 마찬가지로 정체점 부근에 유동의 가속 및 천이로 인하여 두 개의 극대값이 존재한다. 하지만, 하류영역에서는 매우 비대칭적인 열/물질전달계수 분포가 나타나는 것을 알 수 있다. 분사된 제트가 충돌면에 도달한 후 벽을 따라 벽제트(wall jet)가 형성되는데, 하류영역에서는 횡방향 유동의 영향으로 인하여 상류쪽으로 향하는 벽제트가 상대적으로 약화되며, 하류쪽으로 향하는 벽제트에 의한 영향이 증대되는 것을 알 수 있다. 따라서, 열/물질전달 촉진영역이 하류쪽으로 넓게 분포하며, 상류쪽으로 열/물질전달계수가 급격하게 변하는 것을 알 수 있다.

정체점에서의 열/물질전달계수는 하류로 진행하면서 증가하는데 이는 횡방향 유동과 분사제트 간의 상호작용으로 인하여 충돌면에서 분사제트의 난류강도가 증가되기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 경향은 이후 제시되는 국소 열/물질전달계수 분포에 명확하게 나타난다.

판 사이 간격(H)이 작은 경우 충돌제트 사이 영역(mid-way region; $y/d=\pm 3.0$)에서의 열/물질전달은 분사제트보다는 횡방향유동의 영향을 많이 받는다. $H/d=1.0$ 인 경우, 하류영역에서는 제트 사이에서의 유동형태가 덕트 유동과 매우 유사하며, 인접제트간의 상호작용이 거의 일어나지

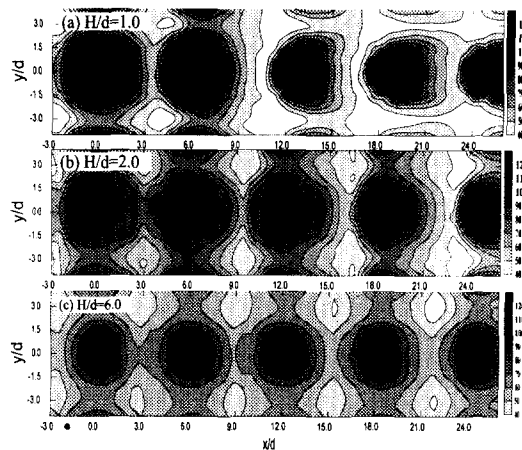


Fig. 5 Contour plots of Sh for array impinging jets without effusion holes at $Re_s=10,000$

않고 하류방향으로 진행한다. 따라서, 정체점 주변영역에 비해 상대적으로 낮은 값을 가지며 폭방향(y/d)으로 불균일한 분포를 갖게 된다.

$H/d=2.0$ 인 경우, 상류영역에서의 전반적인 열/물질전달 특성은 $H/d=1.0$ 인 경우와 유사하다. $x/d>12.0$ 인 하류영역에서는 상류영역에 비해 정체점에서 열/물질전달 촉진영역이 폭방향으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 유동 해석결과(Fig. 3)에서 제시된 와류에 의해 분사제트가 폭방향으로 확산되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 하류로 진행하면서 횡방향 유동성분이 강해지기 때문에 비대칭적인 분포가 나타난다. 하지만 시험부의 단면적이 넓어졌기 때문에 횡방향 유동의 영향이 $H/d=1.0$ 인 경우에 비해 약화되며, 분사제트 사이영역에서의 열/물질전달계수가 $H/d=1.0$ 인 경우에 비해 큰 것으로 나타났다.

상대적으로 판 사이 간격이 큰 경우($H/d=6.0$), 단일 충돌제트의 경우와 마찬가지로 정체점에서 최대값을 갖고 이후 단순감소하는 형태를 갖는다. 이는 분사제트 중심의 난류강도가 증가하며 제트가 확산되면서, 충돌이후 벽제트가 가속되는 현상이 나타나지 않기 때문이다. 또한 판 사이 간격(H)이 큰 경우 출구영역($x/d \geq 24.0$)을 제외하면 열/물질전달계수 분포가 대칭적인 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급했듯이 시험부의 단면적이 증가하여 횡방향 유동이 충돌면에서의 열/물질전달에 큰 영향을 주지 못하기 때문이다.

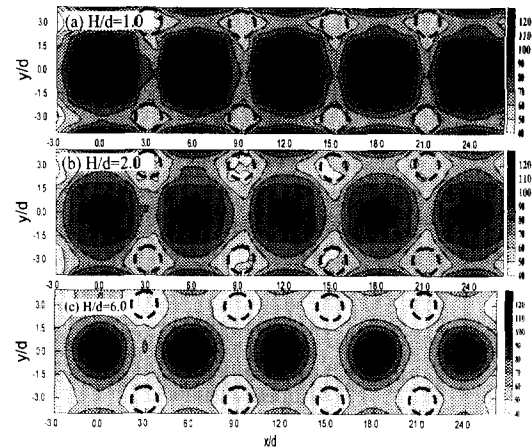


Fig. 6 Contour plots of Sh for array impinging jets with effusion holes at $Re_s=10,000$

유출홀이 설치된 경우에 대한 등 Sh 선도분포는 Fig. 6에 제시되어 있다. 그림에서 점선으로 표시된 원은 분사판에 설치된 유출홀의 위치를 나타낸다. 분사판에 유출홀을 설치함으로써 판 사이 간격(H)에 관계없이 전체적으로 균일한 분포를 갖는 것을 알 수 있다. $H/d=1.0$ 인 경우, 앞에서의 경우와 마찬가지로 정체점 근방영역에 2개의 극대값이 존재하며, 인접제트간의 상호작용 및 유출홀의 영향으로 인하여 Sh 분포가 사각 셀(cell)형태를 띠는 것을 알 수 있다.

충돌면에서 유출홀이 존재하는 위치에서는 상승유동이 발생하여 유출홀을 통하여 유동이 빠져나가기 때문에 상대적으로 낮은 값을 갖는다. 판 사이 간격(H)이 증가함에 따라 분사제트의 확산으로 인하여 분사제트의 중심(core)에서의 난류강도가 증가하기 때문에 정체점에서 하나의 극대값을 갖는다. 또한 분사된 유동 중에 충돌면에도달하기 전에 유출홀을 통해 빠져나가는 유동이 많아지기 때문에 유출홀이 위치한 영역에서의 값이 분사판과 충돌판 사이 간격이 작은 경우에 비해 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 7에는 유출홀이 설치되지 않은 경우에 대하여 국소 Sh 분포가 제시되어 있다. 판 사이 간격이 작은 경우($H/d \leq 2.0$), 상류영역에서는 Sh 분포가 대칭적으로 나타나지만, $x/d > 9.0$ 인 영역에서는 횡방향 유동의 영향이 증대되기 때문에 전반적인 촉진영역이 하류쪽으로 편향되며, 2차 극대점이 정체점에서 하류쪽으로만 형성된다.

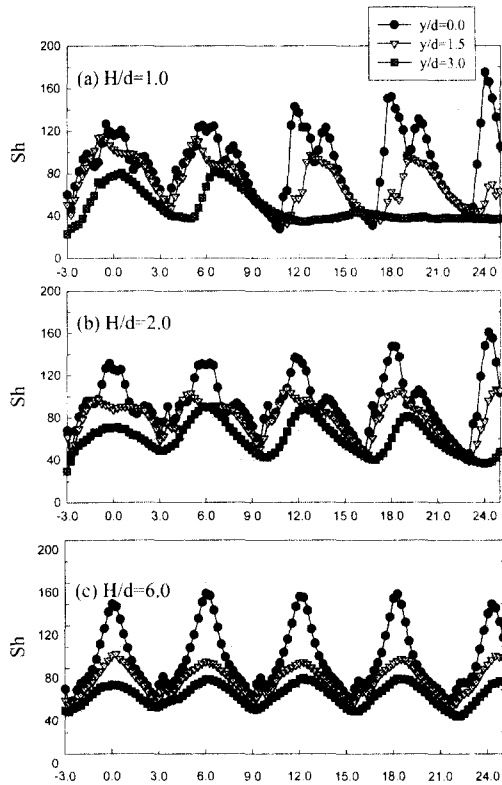


Fig. 7 Local distributions of Sh for array impinging jets without effusion holes at $Re_s=10,000$

이와 더불어, 하류로 진행하면서 정체점에서의 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급했듯이, 하류로 진행하면서 횡방향 유동으로 인하여 충돌면 부근에서 분사제트의 난류강도가 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 하지만, $H/d=1.0$ 인 경우, 판 사이 간격이 매우 작기 때문에 하류영역에서는 덕트 유동과 유사한 유동형태를 띠기 때문에 유동의 재흡입 및 열경계층의 발달 등으로 인하여 분사제트 사이영역($y/d=1.5, 3.0$)에서는 매우 낮은 값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서, 판 사이 간격이 좁은 경우에는 횡방향유동으로 인하여 정체점에서의 값은 증가하지만 제트 사이영역에서의 값이 매우 낮아지기 때문에 국소적으로 열/물질전달계수 분포가 매우 불균일하게 나타나며, 이는 열응력 문제 등을 일으킬 수 있다.

판 사이 간격이 큰 경우($H/d=6.0$), 횡방향 유동의 영향이 매우 약하기 때문에 국소 Sh 분포가

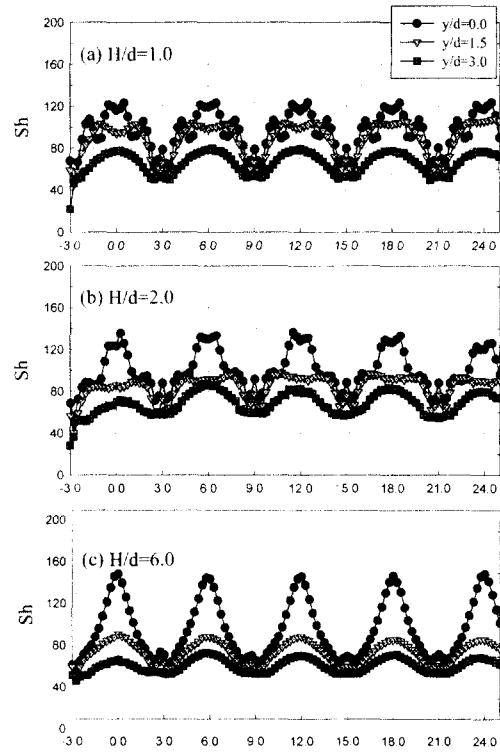


Fig. 8 Local distributions of Sh for array impinging jets with effusion holes at $Re_s=10,000$

상당히 대칭적으로 나타난다. 정체점에서 최대값이 나타나며 판 사이 간격이 작은 경우와는 다르게 정체점에서의 값이 전체적으로 균일하게 나타난다. $y/d=0.0$ 에서의 분포를 보면 각각의 충돌제트의 상류영역($x/d \approx 3.5, 9.5, 16, 22$)에서 하나의 작은 극대값이 나타나는데, 이는 앞서 유동해석 결과(Fig. 3)에서 언급하였듯이, 충돌제트의 상류영역에 형성되는 작은 와류에 의한 것이다.

Fig. 8은 유출홀이 설치된 경우에 대한 국소 Sh 분포를 나타내는 그림이다. 모든 경우에 있어서 전체적으로 대칭적인 분포가 나타나는 것을 알 수 있다. 앞서 언급했듯이, 판 사이 간격이 작은 경우($H/d \leq 2.0$), 정체점 부근에 두 개의 극대값이 존재하며, 판 사이 간격이 큰 경우에는 정체점에 하나의 극대값이 형성된다. 제트와 제트 사이 영역($x/d=3.0, 9.0, 15.0, 21.0$)에서는 인접벽제트간의 상호작용으로 인하여 또 하나의 극대점이 형성된다. 이러한 극대값은 판 사이 간격

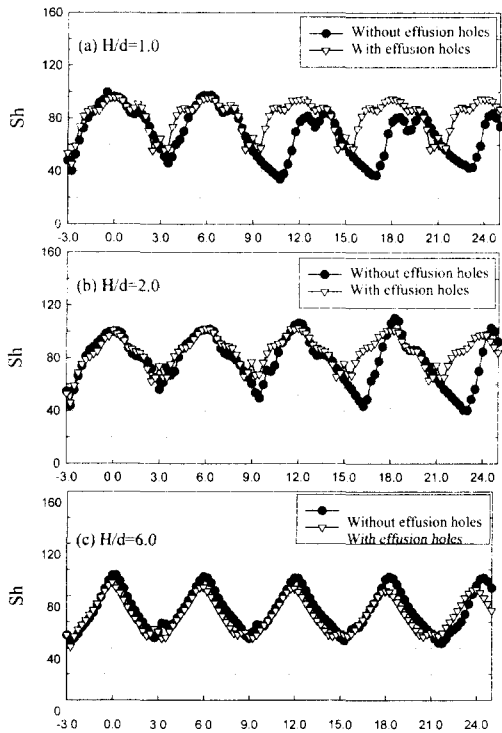


Fig. 9 Lateral average Sh for various gap distances at $Re_d=10,000$

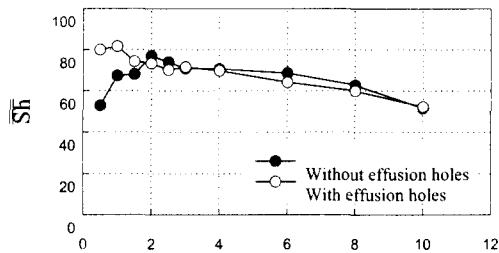


Fig. 10 Overall averaged Sh for various gap distances at $Re_d=10,000$

(H)이 커짐에 따라 감소하는데 이는 간격이 커짐에 따라 분사된 제트가 확산되면서 벽제트의 강도가 약화되기 때문이다.

3.3 평균 열/물질전달특성

Fig. 9는 유출홀이 설치된 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 분사판과 증돌판 사이의 간격을 변화시켰을 때의 폭방향 평균 Sh 분포를 나타내는 그림이다.

판 사이 간격이 작은 경우($H/d \leq 2.0$), 상류영

역($x/d < 9.0$)에서는 유출홀이 설치된 경우와 그렇지 않은 경우의 분포가 유사한 것으로 나타났다. 하지만, 하류로 진행하면서 유출홀이 설치되지 않은 경우 극대값이 하류쪽으로 편향되어서 분포하며, 전반적으로 평균값이 낮은 것으로 나타났다. 이는 횡방향 유동의 영향과 더불어 분사된 사용유체의 재흡입, 열경계층의 발달 등에 기인하는 것으로 생각된다.

판 사이 간격이 큰 경우($H/d=6.0$), 앞에서도 언급했듯이, 유출홀이 설치된 경우와 그렇지 않은 경우가 거의 유사한 분포를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 유출홀이 설치된 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 분사판과 증돌판 사이의 간격을 변화시켰을 때 면적 평균 Sh 수 분포를 나타낸 그림이다. 유출홀이 설치되지 않은 경우, 판 사이 간격이 작은 경우($H/d < 2.0$)에는 횡방향 유동의 영향이 크기 때문에 횡방향 유동에 따른 분사된 사용유체의 재흡입 및 열경계층의 발달 등으로 인하여 낮은 평균값을 갖는다. 판 사이 간격(H)이 증가함에 따라 $H/d=2.0$ 에서 면적평균값이 최대값을 나타내며, 이후 단순감소하는 형태를 갖는다.

유출홀이 설치된 경우, 사용유체가 유출홀을 통해 밖으로 배출되기 때문에 유동의 재흡입 또는 열경계층의 발달이 감소한다. 따라서, 판 사이 간격(H)이 작은 경우에도 평균값이 매우 높은 것을 알 수 있다. 이 경우 $H/d=1.0$ 에서 최대값이 나타났으며, 이는 유출홀이 설치되지 않은 경우에 비해 약 20% 높은 값이다. 이러한 경향은 판 사이 간격(H)이 작아질수록 증대되며, $H/d=0.5$ 인 경우 유출홀이 설치된 경우가 유출홀이 설치되지 않은 경우에 비해 면적평균값이 약 60% 정도 높은 것으로 나타났다.

하지만 상대적으로 판 사이 간격이 큰 경우 ($H/d \geq 3.0$), 유출홀이 설치되지 않은 경우도 덕트의 단면적이 크기 때문에 횡방향유동이 증돌판에서의 열전달에 미치는 영향이 미약하다. 따라서, 면적평균값이 유출홀을 설치한 경우와 그렇지 않은 경우 모두 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 유출홀을 설치한 경우와 그렇지

않은 경우에 대하여 판 사이 간격(H) 변화에 따른 충돌면에서의 국소 열/물질전달특성을 비교·고찰하였다.

유출홀이 설치되지 않는 경우에는 판 사이 간격(H)이 작은 경우 횡방향 유동에 의해서 열/물질전달특성이 크게 변화하였다. 횡방향 유동과 분사제트간의 상호작용으로 인하여 하류쪽 영역에서는 매우 비대칭적인 열/물질전달 특성이 관찰되었다. 또한 횡방향 유동과 더불어 사용유체의 재흡입, 제트 사이영역에서의 열경계층의 발달 등으로 인하여 폭방향으로 불균일한 분포특성이 나타났다.

반면에 판 사이 간격이 큰 경우에는 시험부의 단면적이 크기 때문에 횡방향 유동성분이 매우 약한 것으로 나타났으며, 출구영역을 제외하면 충돌면에서의 열/물질전달에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

유출홀이 설치된 경우, 판 사이 간격(H)이 작은 경우에도 매우 대칭적인 분포가 나타났으며, 평균 열/물질전달계수도 유출홀이 설치되지 않은 경우에 비해 크게 증가한 것으로 나타났다. 이는 유출홀을 설치하는 경우 횡방향 유동이 형성되지 않으므로, 사용유체의 재흡입 현상이 약화되기 때문인 것으로 생각된다. 판 사이 간격(H)이 큰 경우는 유출홀이 설치되지 않은 경우와 거의 유사한 분포를 갖는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 기초전력공학공동연구소 (과제번호: 2000-2-0717)의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Koopman, R. N. and Sparrow, E. M., 1975, "Local and Average Transfer Coefficients due to an Impinging Row of Jets," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 1261~1272.
- (2) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces." *Advanced Heat and Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 1~60.
- (3) Downs, S. J. and James, E. H., 1987, "Jet Impingement Heat Transfer - A Literature Survey," *ASME Paper No. 87-HT-35*.
- (4) Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M. A. and Button, B. L., 1992, "A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 13, pp. 106~115.
- (5) Viskanta, R., 1993, "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets," *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 111~134.
- (6) 윤필현, 이동호, 조형희, 2000, "배열충돌제트에서 횡방향 유동 성분에 따른 열/물질 전달 특성 고찰", *대한기계학회논문집 B권*, 제24권 제2호, pp. 195~203.
- (7) Huber, A. M. and Viskanta, R., 1994, "Effect of Jet-Jet Spacing on Convective Heat Transfer to Confined Impinging Arrays of Axisymmetric Air Jets," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 18, pp. 2859~2869.
- (8) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1996, "Effect of Hole Arrangements on Impingement/Effusion Cooling," *Proceeding of 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference*, pp. 71~76.
- (9) Cho, H. H. and Rhee, D. H., 2000, "Local Heat/Mass Transfer Measurement on the Effusion Plate in Impingement/Effusion Cooling System," *J. Turbomachinery*, Vol. 123 (Accepted).
- (10) 이동호, 조형희, 2000, "연소실 냉각을 위한 충돌제트/유출 냉각 기법에서 유출판에서의 열전달 특성," *대한기계학회 논문집B*, 제24권 제3호, pp.435~442.
- (11) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (12) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (13) Eckert, E. R. G., 1976, Analogies to Heat Transfer Processes, in *Measurements in Heat Transfer*, ed. Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., pp. 397~423, Hemisphere Pub., New York.
- (14) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mech. Eng.*, Vol. 75, pp.3~8.